Journal of Torbat Heydariyeh University of Medical Sciences
2025, Volume 13, No. 2: 26-39.

Original article

Comparison of environmental effects of different municipal waste management options using life cycle assessment (case study: Varamin city)

Mina Rezaei [1], Sajjad Rahimi[2]

1. Vice Chancellery of Health, Torbat Heydariyeh University of Medical Sciences, Torbat Heydariyeh, Iran
2. Department of Basic Sciences, Khomein University of Medical Sciences, Khomein, Iran

Corresponding author: Sajjad Rahimi, Department of Basic Sciences, Khomein University of Medical Sciences, Khomein, Iran. e-mail: sj.rahimi.b@gmail.com

Submitted: 24 December 2024 Accepted: 21 April 2025

Keywords:
Life cycle assessment, Sensitivity analysis, Composting, Municipal waste management, Anaerobic digestion

Abstract

Background & Aim: Population growth, increased consumption, and waste generation are major concerns for human societies. Without proper management, these factors can have adverse effects on the environment and human health. This study aimed to evaluate the environmental impacts of various municipal waste management options using the life cycle assessment (LCA) method and identify the most suitable management scenario.

***Methods*:** In this study, Ecoinvent 3.6 (2019) and SimaPro 9.0.0.48 software were used. The effects of recycling rates on the scenarios were analyzed using sensitivity analysis. The proposed scenarios were as follows: Scenario 1: Composting and landfill disposal**,** Scenario 2: Material recovery facilities (MRF), composting, and landfill disposal**,** Scenario 3: MRF, anaerobic digestion, and landfill disposal**,** Scenario 4: MRF, composting, anaerobic digestion, and landfill disposal**,** Scenario 5: Waste incineration combined with landfill disposal.

***Results*:** The results showed that a higher recycling rate significantly reduces emissions from each waste management system. Scenario 2 had the lowest overall environmental impact, with a global warming potential of 867.20 kg CO_2 eq./t, eutrophication potential of 0.35 kg PO_4 eq./t, acidification potential of 0.17 kg SO_2 eq./t, human toxicity potential of 1.4 kg DB eq./t, and tropospheric ozone formation potential of 0.07 kg C_2H_4 eq./t.

***Conclusion*:** Combining material recovery facilities with biological treatment can considerably reduce environmental impacts. The findings of this study can serve as a reference for cities in developing countries looking to design and implement environmentally sustainable municipal waste management systems that contribute to sustainable development.

How to Cite this Article: Rezaei M, Rahimi S. Comparison of environmental effects of different municipal waste management options using life cycle assessment (case study: Varamin city). J Torbat Heydariyeh Univ Med Sci. 2025;13(2):26-39.DOI:

Copyright © 2025 Journal of Torbat Heydariyeh University of Medical Sciences. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits copy and redistribute the material just in noncommercial usages, provided the original work is properly cite.

مجله دانشگاه علوم پزشکی تربت‌حیدریه
دوره۱۳. شماره ۲. تابستان ۱۴۰۴

مقاله پژوهشی

مقایسه اثرات زیست‌محیطی گزینه‌های مختلف مدیریت پسماند شهری با استفاده از روش ارزیابی چرخه‌حیات (مطالعه موردی: شهر ورامین)

مینا رضائی[۱] ، سجاد رحیمی[۲]

۱. معاونت بهداشتی، دانشگاه علوم پزشکی تربت حیدریه، تربت حیدریه، ایران
۲. گروه علوم پایه، دانشکده علوم پزشکی خمین، خمین، ایران

تاریخ دریافت:
۱۴۰۳/۱۰/۰۴
تاریخ پذیرش:
۱۴۰۴/۰۲/۰۱

کلیدواژه‌ها:
ارزیابی چرخه حیات، آنالیز حساسیت، کمپوت‌سازی، مدیریت پسماند شهری، هاضم بی‌هوازی

تمامی حقوق نشر برای دانشگاه علوم پزشکی تربت‌حیدریه محفوظ است.

چکیده

زمینه و هدف: افزایش جمعیت، افزایش مصرف و تولید پسماند از نگرانی‌های جدی جوامع بشری است که در صورت عدم وجود مدیریت صحیح، اثرات نامطلوبی بر محیطزیست و سلامتی بشر خواهد داشت. مطالعه حاضر، باهدف ارزیابی اثرات زیست‌محیطی گزینه‌های مختلف مدیریت پسماند شهری با استفاده از روش ارزیابی چرخه حیات و با بررسی سناریوهای مختلف و معرفی سازگارترین سناریو انجام شد.

روش‌ها: در این مطالعه از Ecoinvent 3.6 (۲۰۱۹) و نرم‌افزار SimaPro 9.0.0.48 استفاده شد. تأثیر نرخ بازیافت بر سناریوها با استفاده از آنالیز حساسیت مورد ارزیابی قرار گرفت. سناریوهای پیشنهادی به ترتیب شامل سناریو ۱: کمپوست‌سازی و دفن پسماند، سناریو ۲: تأسیسات بازیابی مواد، کمپوست‌سازی و دفن پسماند، سناریو ۳: تأسیسات بازیابی مواد، هاضم بی‌هوازی و دفن پسماند، سناریو ۴: تأسیسات بازیابی مواد، کمپوست‌سازی، هاضم بی‌هوازی و دفن پسماند و سناریو ۵: سیستم پسماندسوزی در ترکیب با دفن پسماند هستند.

نتایج: نتایج نشان داد نرخ بازیافت می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی میزان انتشارات را از هریک از سیستم مدیریت پسماند کاهش دهد. سناریوی ۲ دارای کمترین تأثیر کلی زیست‌محیطی است و نتایج شامل پتانسیل گرمایش جهانی kg CO_2 eq./t ۸۶۷/۲۰ یوتریفیکاسیون معادل kg PO_4^{3-} eq./t ۰/۰۳۵، اسیدی سازی معادل kg SO_2 eq./t ۰/۱۷، پتانسیل سمیت انسان معادل kg 1,4 DB eq./t ۳/۸۹ و تولید ازن تروپوسفری معادل kg C_2H_4 eq./t ۰/۰۷ به دست آمد.

نتیجه‌گیری: درصورت تلفیق تأسیسات بازیابی مواد و تصفیه بیولوژیکی اثرات زیست‌محیطی به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. یافته‌های این مطالعه می‌تواند به‌عنوان مرجعی برای شهرهای کشورهای درحال‌توسعه به‌منظور کمک به برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از سیستم‌های مدیریت پسماند سازگار با محیطزیست و در راستای توسعه پایدار باشد.

نویسنده مسئول: سجاد رحیمی، گروه علوم پایه، دانشکده علوم پزشکی خمین، خمین، ایران
آدرس پست الکترونیک: sj.rahimi.b@gmail.com

مقدمه

مدیریت پسماند جامد شهری از چالش‌های زیست‌محیطی جدی برای کشورهای درحال‌توسعه است. افزایش جمعیت به‌عنوان یک عامل مهم در تولید پسماند به‌ویژه از مناطق مسکونی و نیز بخش‌های تجاری و صنعتی است. باوجود مسائل زیست-محیطی، اجتماعی و اقتصادی، می‌توان از پسماند به‌عنوان یک منبع ارزشمند به‌منظور تولید انرژی و نیز تأمین نیازهای انرژی آینده استفاده نمود (۱). بااین‌حال مدیریت نامناسب پسماند، پتانسیل گرمایش جهانی و تأثیرات منفی بر محیط‌زیست درنتیجه انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت انسان از قبیل متان، دی‌اکسیدکربن، اکسیدهای نیتروژن دارد (۲). تجزیه‌وتحلیل، نظارت، پایش و اندازه‌گیری سیستم‌های مدیریت پسماند پیچیده و دشوار است (۳)؛ بنابراین با ایجاد یک سیستم مدیریت پسماند با ساختار استاندارد اثرات منفی بر سلامت انسان و محیط‌زیست به حداقل می‌رسد (٤).

ارزیابی چرخه حیات ابزار مبتنی بر تعیین کمیت بارهای زیست-محیطی بالقوه مرتبط با چرخه عمر محصول یا یک فرآیند است. ارزیابی چرخه حیات (LCA) که براساس استاندارد سری ۱٤۰٤۰ ایزو تدوین‌شده روشی برای سنجش اثرات زیست‌محیطی یک محصول یا فرآیند در کل چرخه حیات آن است. این ارزیابی شامل چهار مرحله است: ۱) تعریف هدف و دامنه (تعیین محدوده و اهداف مطالعه)، ۲) تحلیل موجودی چرخه حیات (LCI) (جمع‌آوری داده‌های ورودی و خروجی)، ۳) ارزیابی تأثیر چرخه حیات (LCIA) (تحلیل اثرات زیست‌محیطی با روش‌هایی مانند ReCiPe و ٤) تفسیر نتایج (تحلیل داده‌ها، شناسایی نقاط بحرانی و ارائه راهکارهای بهبود) (۲).

یکی از قدرتمندترین نرم‌افزارهای مورداستفاده در ارزیابی چرخه حیات، نرم‌افزار SimaPro است که توسط یک شرکت هلندی توسعه‌یافته است. این نرم‌افزار داده‌های ورودی را پردازش کرده و اثرات زیست‌محیطی (۱۸ پدیده زیست‌محیطی(تغییرات اقلیمی، اسیدی شدن، یوتریفیکاسیون و غیره) و نیز فاکتورهای نهایی (سلامت انسان، کیفیت اکوسیستم و کاهش منابع)) را محاسبه و به متخصصان، محققان و شرکت‌ها کمک می‌کند تا اثرات زیست‌محیطی محصولات و فرآیندها را در طول چرخه حیاتشان ارزیابی و بهینه‌سازی کنند (۲, ٥). در مطالعه‌ای سناریو پیشنهادی شامل دفن پسماند، کمپوست، هضم بی‌هوازی و بازیافت و تأثیر آن بر شاخص‌های زیست‌محیطی با استفاده از نرم‌افزار GaBiPro مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفتند. نتایج حاصل از مطالعات نشان داد که سیستم مدیریت پسماند جامد شهری شهر دهلی به دلیل انتشارات حاصل از حمل‌ونقل و دفن پسماند بر محیط‌زیست تأثیر منفی می‌گذارد (٦). با استفاده از ارزیابی چرخه حیات، چهار سناریو مدیریت پسماند در شهر ناگپور کشور هند موردبررسی قرار گرفت.

نتایج نشان داد که پارامترهای گرمایش جهانی، سمیت انسان و یوتریفیکاسیون، ایجاد ازن فتوشیمیایی در سناریوهای تأسیسات بازیابی مواد، کمپوست‌سازی و دفن کمترین اثرات زیست‌محیطی در مقایسه با سناریوهای کمپوست‌سازی و دفن به‌تنهایی داشتند (۷). یاد او و همکاران نیز در سال ۲۰۱۸ به نتیجه مشابه دست یافتند (۸).

سریواستاوا و نما چهار گزینه مدیریت پسماند (کمپوست، بازیافت، سوزاندن و دفن) را برای دهلی ارزیابی کردند. داده‌های موردبررسی شامل کمیت و ترکیب زباله به‌عنوان ورودی و بازیافت انرژی، انتشار به هوا و آب به‌عنوان خروجی است. این مطالعه نتیجه گرفت که بازیافت اثرات زیست‌محیطی کمی دارد (۹). Babu و همکاران چهار گزینه دفن زباله – تلنبار کردن در فضای باز، دفن زباله با و بدون جمع‌آوری گاز و دفن زباله به‌صورت راکتور زیستی - را برای شهر بنگلور مقایسه کرد. داده‌های موجودی شامل مصرف سوخت و برق به‌عنوان ورودی و انتشار گازهای گلخانه‌ای از عملیات واحد به‌عنوان خروجی است. بر اساس پتانسیل کاهش انرژی، پتانسیل گرمایش جهانی و اوتروفیکاسیون، این مطالعه به این نتیجه

رسید که دفن زباله‌های بیو راکتور حداقل تأثیرات را داشته است (۱۰).

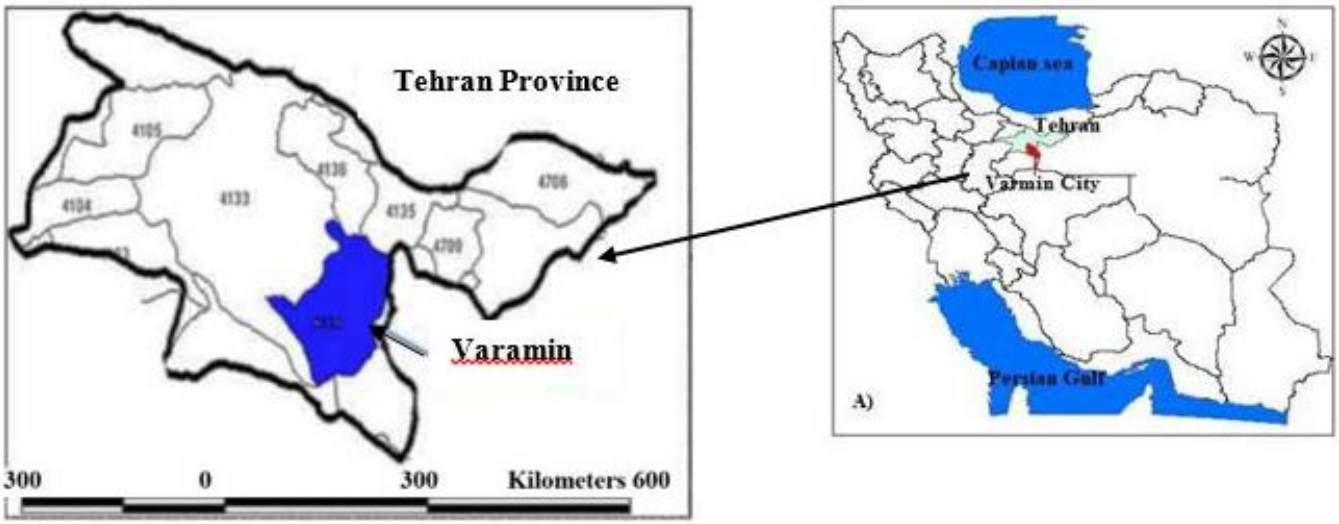
بنابراین، هدف از انجام پژوهش حاضر، بررسی ارزیابی چرخه حیات و ارائه یک ابزار پشتیبانی تصمیم‌گیری مناسب جهت درک اثرات زیست‌محیطی ناشی از گزینه‌های مختلف مدیریت پسماند در شهر ورامین، به‌منظور انتخاب بهترین سناریو جهت به حداقل رساندن اثرات زیست‌محیطی با استفاده از نرم-افزار SimaPro 9.0.0.48 است. انتظار می‌رود یافته‌های تحقیق حاضر به تعیین بهترین فرصت‌ها برای کاهش تأثیرات منفی آینده در مدیریت پسماند بینجامد.

روش‌ها

منطقه موردمطالعه و مشخصات پسماند شهری

شهر ورامین در جنوب شرق تهران به عرض جغرافیایی ۳۵/۳۲ و طول جغرافیایی ۵۱/٦٤ و در ارتفاع ۹۱۸ متری از سطح دریا است (شکل۱). طبق سرشماری اخیر سال ۱۳۹۵، جمعیت آن ۲۲۸/٦۲۸ و تراکم جمعیت ٤٦٨٣٤٩ نفر در هر کیلومترمربع است. ترکیب پسماند در جدول ۱ ارائه‌شده است.

باتوجه به ترکیبات پسماند، برای بازیابی منابع از آن، روش‌های تصفیه بیولوژیکی مانند کمپوست و هاضم بی‌هوازی، ممکن است مناسب باشد. علاوه بر این، پسماند آلی مانند پلاستیک، لاستیک، چرم و چوب که ارزش حرارتی بالایی دارند، می‌توانند با استفاده از گزینه‌هایی مانند سوزاندن مدیریت شوند. جهت تجزیه‌وتحلیل داده‌ها و مقایسه سناریوهای مختلف از نرم‌افزار Excel و برای نمایش مناسب نتایج از نمودارهای میله‌ای به‌منظور تصمیم‌گیری بهینه در طراحی پایدار استفاده شد.



شکل۱: موقعیت جغرافیایی شهرستان ورامین، استان تهران

جدول۱: خصوصیات پسماند موردمطالعه

نوع پسماند	درصد	نوع پسماند	درصد	نوع پسماند	درصد
مواد آلی	٤۱/۳	کاغذ	۱۱/۹	مواد خنثی	۱۸/۸
پلاستیک	۹/۹	شیشه	۰/٤	چرم	۰/٦
منسوجات	٥/۳	سایر مواد	۱۰/٦	فلز	۰/۸
مواد خطرناک خانگی	۰/٤	–	–	–	–

ارزیابی چرخه حیات

پژوهش حاضر براساس استاندارد ISO 14040 در چهار بخش هدف و دامنه، تعیین ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم، ارزیابی اثرات زیست‌محیطی و تفسیر داده‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (۱۱).

تعریف هدف و محدوده

این مطالعه باهدف مقایسه اثرات زیست‌محیطی احتمالی پنج سناریو مدیریت پسماند با استفاده از ارزیابی چرخه حیات انجام شد. محدوده دوره در نظر گرفته‌شده از دروازه تا گور بود که شامل حمل‌ونقل پسماند به تأسیسات تصفیه (تلنبار کردن، تأسیسات بازیافت مواد، کمپوست، هضم بی‌هوازی و سوزاندن) و همچنین دفع نهایی آن است. مرز سیستم و همچنین ورودی‌ها (انتقال جرم، مصرف انرژی)، خروجی، انتشارت به محیطزیست و محصولات تولیدی (بیوگاز، الکتریسیته، کمپوست و مواد هضم شده) در شکل ۲ نشان داده‌شده است. لازم به ذکر است که در پژوهش حاضر جریان شیرابه و انتشار از سطوح زمین در نظر گرفته نشد و استراتژی جمع‌آوری پسماند برای همه سناریوها در منطقه موردمطالعه یکسان فرض شده است. در این مطالعه به‌منظور مدل‌سازی، تحلیل و بررسی اثرات زیست‌محیطی از نرم‌افزار SimaPro 9.0.0.49 و پایگاه داده Ecoinvent Database 3.6 و روش Recipe Midpoint (H) V 1.13 استفاده شد. واحد عملکردی یک مفهوم کلیدی در مطالعات ارزیابی اثرات زیست‌محیطی می‌باشد که امکان مقایسه اثرات احتمالی در سناریوهای مختلف را فراهم می‌سازد و در این مطالعه به ازای یک‌تن پسماند در نظر گرفته‌شده است.

سناریوهای پیشنهادی مدیریت پسماند

کمپوست‌سازی و دفن پسماند

درمجموع ۲۵ درصد از پسماند شهری به واحد تولید کمپوست و ۷۵ درصد باقیمانده مستقیماً و بدون هیچ‌گونه پردازشی به مرکز دفن انتقال می‌یابد. فرض بر این است که کمپوست تولیدشده به‌عنوان کود کشاورزی قابل‌استفاده است. در این مطالعه روش تولید کمپوست از نوع ویندرو بوده که توسط دستگاه ترنر، زیرورو می‌شود. در طی این فرآیند ماشین‌آلاتی جهت غربالگری پیش و پس‌پردازش و آلودگی‌زدایی استفاده می‌شود که همگی نیاز به مصرف برق و سوخت دیزل دارند. در مطالعه حاضر انتشارات ناشی از مصرف انرژی و انتشار مستقیم از فرآیند کمپوست‌سازی در نظر گرفته شدند همچنین به ازای هر تن پسماند ۱/۳۳ لیتر سوخت دیزل و ۲/۷ کیلووات ساعت برق نیاز است (۱۲).

تأسیسات بازیابی مواد، کمپوست‌سازی و دفن پسماند

در این سناریو ۱۵ درصد پسماند جهت بازیابی مواد باارزش و قابل‌استفاده مجدد به تأسیسات بازیابی مواد، ۵۵ درصد به واحد تولید کمپوست (بخش آلی پسماند) و ۳۰ درصد باقیمانده بدون هیچ‌گونه عملیاتی به مرکز دفن منتقل می‌شوند. البته لازم به ذکر است که زائدات باقیمانده از تأسیسات بازیابی مواد و واحد تولید کمپوست نیز به مراکز دفن منتقل می‌شود. تأسیسات بازیابی مواد شامل تسمه نقاله جهت انتقال پسماند که نیاز به مصرف برق و روغن دیزل دارد. فرض بر این است که عملیات تفکیک به‌صورت دستی انجام می‌شود. در این واحد انتشارات تولیدشده به دلیل مصرف انرژی خواهد بود همچنین به ازای هرتن پسماند ۰/۷ لیتر گازوئیل و ۰/۰۴۵ کیلووات ساعت برق نیاز است (۷).

تأسیسات بازیابی مواد، هاضم بی‌هوازی و دفن پسماند

در سناریو سوم فرض بر این است که ۱۵ درصد پسماند جهت بازیابی مواد باارزش و قابل‌استفاده مجدد به تأسیسات بازیابی مواد، ۵۵ درصد به واحد هاضم بی‌هوازی (بخش آلی پسماند) و ۳۰ درصد باقیمانده بدون هیچ‌گونه عملیاتی به مرکز دفن منتقل می‌شوند. لازم به ذکر است که زائدات هریک از مراحل به مرکز دفن منتقل می‌شود و بیوگاز تولیدشده از هاضم بی‌هوازی خالص‌سازی شده و از آن در واحد حمل‌ونقل به‌عنوان جایگزین سوخت‌های فسیلی و یا در مناطق مسکونی استفاده می‌شود و از مواد هضم شده می‌توان به‌عنوان کود استفاده کرد. فرض بر این است که به ازای هرتن پسماند آلی ورودی به هاضم ۸۵۰

کیلوگرم ماده هضم شده (۱۲) و ۱۲۰ مترمکعب بیوگاز تولید خواهد شد (۱۳). از طرفی احتمال کاهش پتانسیل گرمایش جهانی متصور می‌شود (یک مترمکعب بیوگاز معادل ۰/۴۵ کیلوگرم گاز مایع است (۱۴) و هرکیلوگرم گاز مایع ۱/۶۷ کیلوگرم دی اکسیدکربن منتشر می‌کند) (۱۵).

تأسیسات بازیابی مواد، کمپوست‌سازی، هاضم بی‌هوازی و دفن پسماند

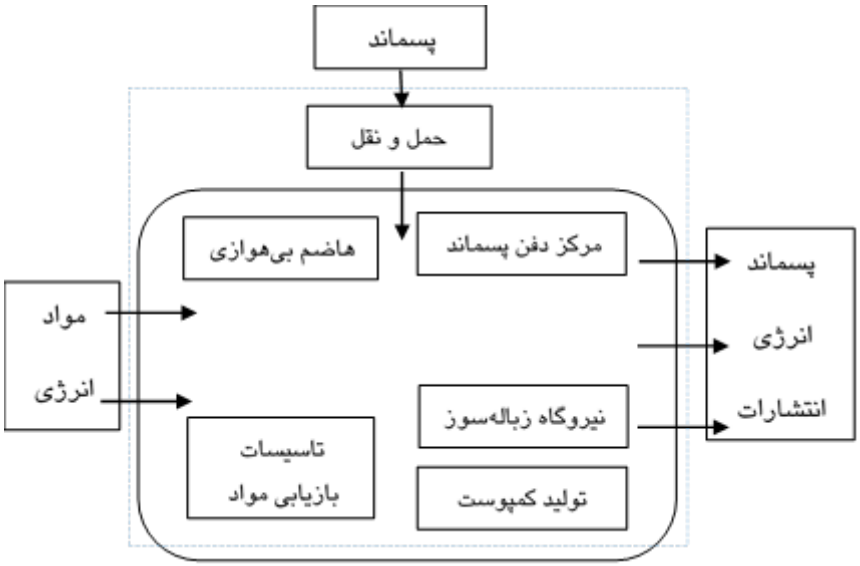
در سناریو چهارم فرض بر این است که ۱۵ درصد پسماند جهت بازیابی مواد باارزش و قابل‌استفاده مجدد به تأسیسات بازیابی مواد، ۵۵ درصد به واحد تصفیه بیولوژیکی (هاضم بی‌هوازی و تولید کمپوست) و ۳۰ درصد باقیمانده بدون هیچ‌گونه عملیاتی به مرکز دفن منتقل می‌شوند. بیوگاز، کود کمپوست و ماده هضم شده از محصولات نهایی سناریو پیشنهادی است.

سناریو پنجم: سیستم زباله‌سوزی در ترکیب با دفن پسماند

۸۰ درصد پسماند به نیروگاه زباله‌سوز منتقل می‌شود و مقدار باقی‌مانده در مرکز دفن، دفع می‌شود. نیروگاه زباله‌سوز از نوع بستر سیال پیوسته در نظر گرفته شد. فرض براین است که سوزاندن با مصرف انرژی همراه است (۷۰ کیلووات ساعت به ازای هرتن پسماند) (۱۶). در مطالعه حاضر انتشار حاصل از فرآیند سوزاندن و مصرف برق در نظر گرفته‌شده است. زباله-سوز بسترسیال پیوسته معمولاً در دمای ۸۰۰-۹۰۰ درجه سلسیوس بهره‌برداری می‌شود و به ازای هرتن پسماند ۰-۵۰ کیلوگرم متان و ۰/۰۶۷کیلوگرم اکسیدنیتروژن منتشر می‌کند (۱, ۱۷).

فهرست چرخه حیات

یک گام اساسی در فرآیند ارزیابی چرخه حیات، تهیه فهرستی از قبیل از جریان‌های مواد، جریان‌های انرژی و انتشارات محیطی است. در ابتدا، شناسایی تمام فرآیندهایی که در طول چرخه زندگی یک محصول یا فرآیند اتفاق می‌افتد، از تولید انرژی و مواد خام گرفته تا دفع پسماند می‌بایست در نظر گرفته شود. علاوه بر این، مستقیماً در طول فرآیند و یا از طریق مطالعات کتابخانه‌ای و پایگاه‌های داده موجود، داده‌های مربوط به فرآیندها شامل ورودی‌ها، خروجی‌ها و انتشارات در هوا، آب‌وخاک جمع‌آوری شد.



شکل۲: مرزبندی سناریوهای پیشنهادی موردمطالعه

با توجه به مرز سیستم در نظر گرفته‌شده در این مطالعه، چرخه حیات سیستم مدیریت پسماند و انتشار گازهای گلخانه‌ای به محیط و همچنین ورودی‌هایی مانند گازوئیل به‌عنوان سوخت، انرژی و خروجی‌هایی مانند کود کمپوست، ماده هضم شده و

بیوگاز محاسبه می‌شود. اطلاعات در سه بخش ورودی‌ها، محصولات و انتشارات در جدول ۲ ارائه‌شده است.

آنالیز حساسیت

آنالیز حساسیت از طریق تغییر نرخ بازیافت پسماند در سناریوهای مختلف و با در نظر گرفتن پارامترهای زیست-محیطی، اثرات زیست‌محیطی را بررسی می‌کند. درصد مواد بازیافت شده از پسماند به‌عنوان نرخ بازیافت در نظر گرفته‌شده است. در این مطالعه مواد قابل بازیافت شامل کاغذ، پلاستیک، شیشه، فلزات، لاستیک و چرم و منسوجات در نظر گرفته‌شده‌اند. در هر یک از سناریوها، اثرات نرخ‌های مختلف بازیافت، از ۱۰ درصد تا ۷۰ درصد موردبررسی قرارگرفته است (۱۸, ۱۹).

جدول۲: اطلاعات ورودی برای سناریوهای پیشنهادی سیستم مدیریت پسماند

ورودی‌ها	واحد	سناریو ۱	سناریو۲	سناریو۳	سناریو۴	سناریو۵
دیزل	L	۲/۵۹	۲/۳۸	۲/۳۸	۲/۸	۲/٤٥
الکتریسیته	KWh	۰/۵۲	۱/۳	۱۵	۷/۳	۵۲
محصولات جانبی						
کمپوست	T	۰/۰۵۹	۰/۱٦		۰/۰۷	–
ماده هضم شده	T	–	–	۰/٤	۰/۲	–
بیوگاز	M^3	–	–	۱/۳	۱/٤	–
الکتریسیته	KWh	–	–	۲۱/۲	۲۱/۲	–
حرارت	MJ	–	–	۲٤/۰۵	۲٤/۰۵	–
خروجی‌ها (انتشار به هوا)						
CO_2	Kg	۱۹۲۰/۵	۹۷٤/۲	۹٦٤/۳	۹٦۹/٦	۱۷۲۵
SO_2	Kg	۰/۲	۰/۱٤۵	۰/۲۲	۰/۰۱۸	۰/۵۱
PO_4	Kg	۰/۰۷	۰/۰۳٤	۰/۰۳٤	۰/۰۳٤	۱/۵
1,4 DB	Kg	۷	۳/۸۹	۵/۷۸	٤/٦۷	۸۹۸/٦
Sb	Kg	–۰/۰۵	–۰/۰۳	–۰/۰۳	–۰/۰۳	–۰/۰٤
C_2H_4	Kg	۰/۰۹۵	۰/۰٦٦	۰/۰۸۱	۰/۰۷	–۰/۰۱

نتایج

اثرات زیست‌محیطی سناریوهای پیشنهادی مدیریت پسماند شهری

طبق برآورد، میزان تولید پسماند در شهر ورامین ۳۲۷ تن در روز و سرانه تولید ۷۵۰–۷۰۰ گرم به ازای هر نفر در روز به دست آمد. گازهای کنترل نشده، سوزاندن، حمل‌ونقل، فرآیندهای تصفیه بیولوژیکی و تولید انرژی عمده‌ترین فعالیت-هایی هستند که باعث انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شوند. سهم فرآیندها در انتشار گازهای گلخانه‌ای و مزایای هریک از سناریوها در جدول ۳ نشان داده‌شده است. مشخص شد که سناریوی ۲ دارای حداکثر مزیت در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است. علاوه بر این، مزایای کاهش انتشار گازهای از طرفی سناریوهای ۲ و ۵ به ترتیب کمترین و بیشترین سهم در انتشار محصولات اسیدی (معادل SO_2 eq./ton ۰/۱۷ kg و ۰/٤۹) دارد. لازم به ذکر است که سناریو ۲ و ۳ کمترین تأثیر اوتروفیکاسیون ۰/۰٤ kg PO_4^{3-} eq./t را دارند. از میان نتایج احتمالی، سناریوی ۲ کمترین تأثیر سمیت (kg 1,4 DB eq./t ۳/۸۹) را دارد. مطابق نتایج، سناریوی ۵ کمترین میزان پتانسیل اکسیداسیون (معادل C_2H_4 eq./t kg ۰/۰۲–) و سناریو ۱ بیشترین میزان (معادل C_2H_4 eq./t kg ۰/۱) دارد.

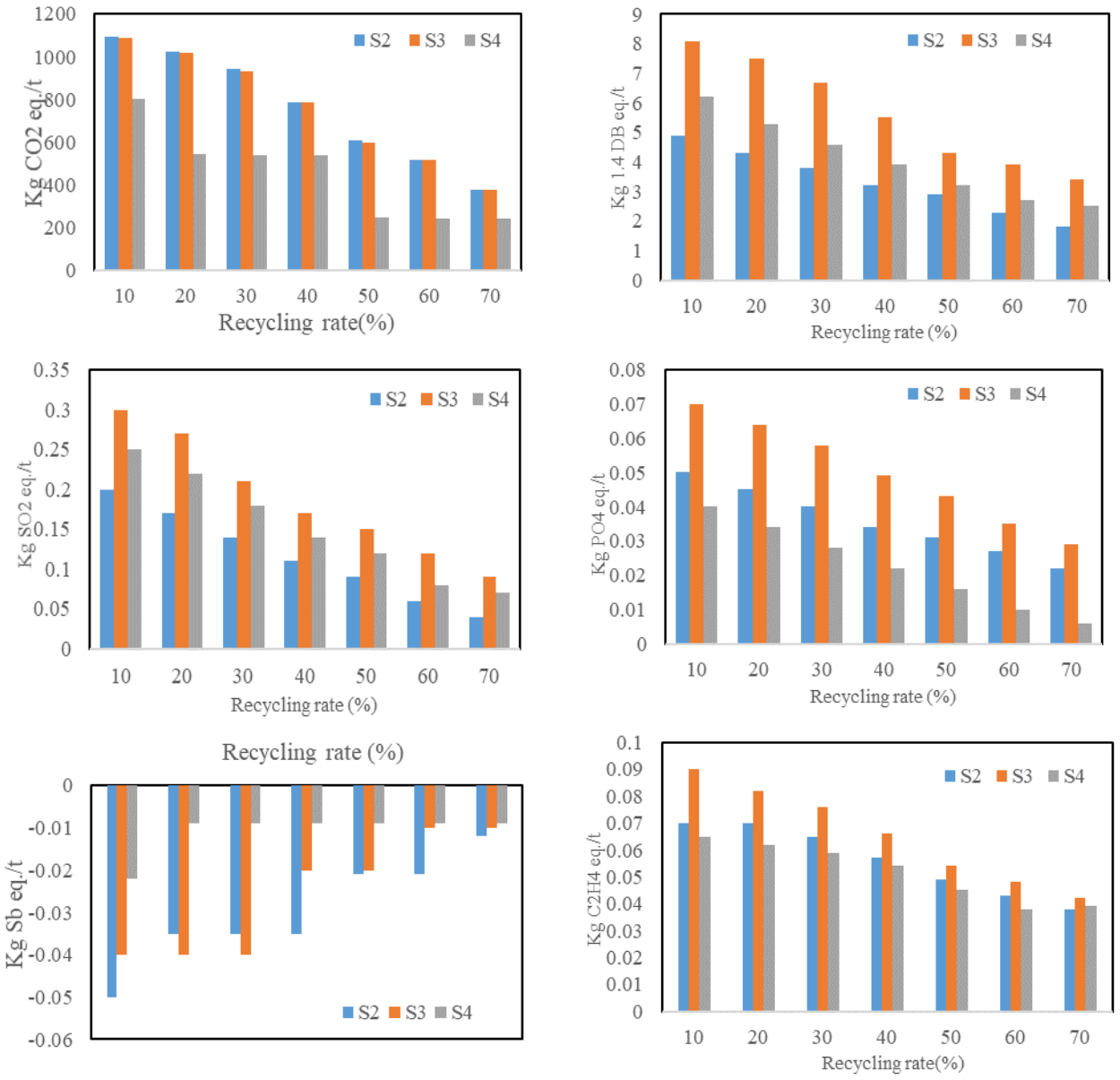
همچنین، مقادیر به‌دست‌آمده از پارامترها برای انتشار گازهای گلخانه‌ای، پتانسیل اسیدسازی، پتانسیل اتریفیکاسیون، پتانسیل سمیت انسانی به ترتیب $kg\ CO_2eq\ t^{-1}$ ۵/۶۵ تا ۱۱/۳۶، $kg\ SO_2eq$ t^{-1} ۱/۲۴ تا ۳/۳۴۵، $kg\ PO_4eq\ t^{-1}$ ۰/۱۹ تا ۰/۶۸، $kg\ 1,4\text{-}DBeq$ t^{-1} ۰/۳۵ تا ۴/۲۲ به دست آمد. نتیجه آنالیز حساسیت براساس افزایش نرخ بازیافت از ۱۰ به ۷۰ درصد در شکل ۱ آمده است. این بررسی برای سناریوهای ۲، ۳ و ٤ که دارای تأسیسات بازیابی مواد هستند انجام شد. مطابق نتایج، تغییر در نرخ بازیافت (تغییر در کمیت مواد بازیافتی مانند کاغذ، پلاستیک، فلزات، منسوجات و غیره که برحسب درصد کمی‌سازی شده‌اند) و اثرات آن بر محیط زیست همبستگی معکوس دارد. گلخانه‌ای را می‌توان در سناریوهای ۱، ۳ و ٤ مشاهده کرد (شکل ۳)، اما نسبت به سناریو ۲ کمتر است. همچنین، جدول ٤ نشان می‌دهد که سناریوهای ۱ و ۲ به ترتیب بیشترین و کمترین پتانسیل گرمایش جهانی $kg\ CO_2/ton$ ۱۹۲۰/۳ و ۸٦۷/۲۰ را دارد.

جدول۳: سهم فعالیت‌ها در پتانسیل گرمایش جهانی و فواید هریک از سناریوها در پتانسیل گرمایش جهانی

سهم فعالیت‌ها در انتشار گازهای گلخانه‌ای	واحد	سناریو ۱	سناریو۲	سناریو۳	سناریو۴	سناریو۵
گاز لندفیل کنترل نشده	$Kg\ CO_2\ eq./t$	۱۹۱۵/۱۸	۸۵۷/۵۳	۹۱۹/٤٥	۸٦۸/۳۸	۳۳۹/۳
حمل‌ونقل		۲/۳۰	۲/۳۰	۲/۳۰	۲/۳۰	۲/۳۰
تولید کمپوست		۷/۱۲	۲۱/٤		۱٤/۳	–
هضم بی‌هوازی		–	–	٤۰	۲۹/۸	–
نیروگاه زباله‌سوزی		–	–	–	–	۱۲۰۱/۳
مصرف الکتریسیته			۰/۰۲	۰/۱۲	۰/۰٦	۰/۵۵
مصرف دیزل		۱/۷۲	۲/۸۵	۰/۲۸	۲/۱	
فواید هریک از فعالیت‌ها		**سناریو ۱**	**سناریو۲**	**سناریو۳**	**سناریو۴**	**سناریو۵**
جایگزینی سوخت مایع با بیوگاز	$Kg\ CO_2\ eq./t$	–	–	٤٦/۷	۲۳	–
عدم استفاده از کودهای معدنی (کمپوست)		۱/٤	٤/٤۰	–	۲/۷	–
عدم استفاده از کودهای معدنی (ماده هضم شده)		–	–	۱۰	٤/٦	–
کاهش انتشار کربن در صورت استفاده از ماده هضم شده			–	–	۵/۷۸	–
کاهش انتشار کربن در صورت استفاده از مواد کمپوست		٤/٦۲	۱۲/۵	۳/۷	۵/٤	–
اجتناب از تولید برق (هاضم)		–	–	۰/۲۵	۰/۲۵	–
اجتناب از مصرف سوخت		–	–	۲/۱	۲/۱	–
کل سهم انتشار گاز گلخانه‌ای		۱۹۲۰/۳	۸٦۷/۲۰	۸۹۹/٤	۸۷۳/۱۱	۱۵٤۳/٤۵

جدول۴: نتایج چرخه حیات سناریوهای پیشنهادی

سناریوها	اسیدی شدن محیط (Kg SO_2 eq./t)	اوتریفیکاسیون (Kg PO_4 eq./t)	گرمایش جهانی (Kg CO_2 eq./t)	پتانسیل سمیت (Kg 1,4DB) eq./t	Kg Sb eq./t	اکسیداسیون (Kg C_2H_4 eq./t)
۱	۰/۲	۰/۰۶	۱۹۲۰/۳	۷/۰۰	-۰/۰۶۵	۰/۱
۲	۰/۱۷	۰/۰۳۵	۸۶۷/۲۰	۳/۸۹	-۰/۰۳۳	۰/۰۷
۳	۰/۲۲	۰/۰۳۵	۸۹۹/٤	٦/٥۹	-۰/۰۳۳	۰/۰۸
۴	۰/۱۸	۰/۰٤٥	۸۷۳/۱۱	٤/۱۳	-۰/۰۳٥	۰/۰۷٥
۵	۰/٤۹	۰/۰٥	۱٥٤۳/٤٥	۱۰۰۰/۲۰	-۰/۰٥	-۰/۰۲



شکل ۳: نمودار آنالیز حساسیت سناریوهای پیشنهادی (سناریوهای۲، ۳ و ۴)

بحث

براساس نتایج، پیشگیری از دفن پسماند در مراکز دفع مهم‌ترین نقش را در کنترل و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد. علاوه بر این، استفاده از بیوگاز به‌جای گاز مایع، استفاده از کمپوست و مواد هضم شده به‌جای کودهای معدنی، تولید انرژی و حرارت از هاضم‌ها همگی باعث کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شوند (۱). سهم فرآیندها در انتشار گازهای گلخانه‌ای و مزایای هریک از سناریوها در جدول ۳ نشان داده‌شده است. مشخص شد که سناریوی ۳ دارای حداکثر مزیت در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است و دلیل آن این است که نسبت بیشتری از پسماندهای آلی به هاضم بی‌هوازی منتقل می‌شود و بیوگاز ناشی از آن جایگزین گاز مایع به‌عنوان سوخت پخت‌وپز در منازل و از طرفی کود حاصل‌شده در کشاورزی مورداستفاده قرار می‌گیرد. گازهای مسئول گرمایش کره زمین شامل متان، دی‌اکسیدکربن، اکسیدهای نیتروژن و هیدروکلروفلوروکربن‌ها هستند. تجزیه بخش آلی پسماند توسط فرآیندهای بیولوژیکی منجربه تولید بیومتان و دی‌اکسیدکربن بیوژنیک و سوزاندن بخش غیرقابل تجزیه زیستی پسماند (پلاستیک، پارچه، لاستیک و چرم) در نیروگاه‌های زباله‌سوزی باعث آزادسازی دی‌اکسیدکربن غیرزیستی می‌شود. اگرچه فرض بر این است که دی‌اکسیدکربن بیوژنیک در گرمایش زمین بی‌تأثیر بوده و متان یک گاز گلخانه‌ای قوی است (۲, ۳).

جدول ٤ نشان می‌دهد که سناریوی ۲ دارای کمترین پتانسیل گرمایش جهانی بوده و دلیل آن وجود فرآیند تولید کمپوست است که باعث کاهش میزان تولید متان زیستی می‌شود. تحقیقات نشان داد، دفن یک کیلوگرم پسماند (متوسط ترکیب پسماند در کشورهای اروپایی) دارای پتانسیل گرمایش جهانی ۱/۰۸ نانوگرم است که از مطالعه حاضر کمتر به نظر می‌رسد (۲۰). در مطالعه دیگری پتانسیل گرمایش جهانی ناشی از دفن پسماند آلی در حدود ۳۷ درصد و نسبت به سایر پارامترهای زیست‌محیطی سهم بیشتری را به خود اختصاص داده است (۲۱). یک تن پسماند آلی ۰/۳۳ تن کمپوست تولید می‌کند (۱۷) و یک تن کمپوست می‌تواند ۷۰ کیلوگرم دی‌اکسیدکربن (۲۲) منتشر کند و یک تن پسماند آلی می‌تواند ۰/۸۵ تن ماده هضم شده (۲۳) تولید کند و یک تن ماده هضمی ۸ کیلوگرم دی-اکسیدکربن (۲٤) آزاد می‌کند. این اطلاعات در برآورد اثرات سناریوها مختلف استفاده‌شده است.

طی فرآیند کمپوست، گازهای اسیدی مانند اکسیدهای نیتروژن و اکسیدهای سولفور به اتمسفر آزاد می‌شوند که علت اصلی اسیدی شدن محیط‌زیست است. محققان اخیراً به این نتیجه رسیده‌اند که اکسیدهای نیتروژن، سهم اسیدی شدن بیشتری نسبت به اکسیدهای سولفور دارد که ممکن است به دلیل استفاده ازکودهای معدنی نیتروژن‌دار و ویژگی‌های پسماند شهری باشد (۷). سناریوی ٥ بیشترین سهم در انتشار ترکیبات اسیدی ۰/٤۹ kg SO_2 eq./ton دارد که علت آن، تبدیل محتوای سولفور و نیتروژن پسماند سوزانده شده به گازهای اسیدی مانند اکسیدهای سولفور و نیتروژن است که پدیده اسیدی شدن را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. علاوه بر این، فرآیندهای کمپوست‌سازی و دفن پتانسیل انتشار گازهایی مانند اکسیدهای نیتروژن و آمونیاک را دارند. سناریوی ۲ با کمترین سهم تأثیرگذاری (معادل ۰/۱۷ kg SO_2 eq./ton) برآورد شد؛ زیرا محتوی سولفور و نیتروژن کمتری در فرآیندهای کمپوست-سازی و تأسیسات بازیابی مواد درگیر فرآیندهای اکسیداسیون می‌شوند. مطالعات دیگر پژوهشگران نشان می‌دهد که نیروگاه زباله‌سوزی بیشترین تأثیر اسیدی‌سازی محیط kg SO_2 eq./ton ۰/٦٥ را دارد (٥). یک مطالعه گزارش داد که کمپوست‌سازی با دفن پسماند دارای کمترین میزان اسیدی‌سازی kg SO_2 eq./ton ۰/۱۹ و تأسیسات بازیابی مواد، هاضم بی‌هوازی با سناریوی دفن پسماند دارای بالاترین قدرت اسیدی‌سازی معادل kg SO_2 eq./ton ۰/٦٨ است (۷).

Rahimi و همکاران در سال ۲۰۱۹ بیان کردند که سناریو کمپوست کردن (٥٥ درصد)، بازیافت (۱۰ درصد)، بازیابی انرژی (٥ درصد) و دفن بهداشتی (۳۰ درصد) حداقل اثرات

زیست‌محیطی را دارد (۲۱). همچنین Pragga و همکاران در سال ۲۰۲٤ با استفاده از ارزیابی چرخه حیات نشان دادند که دفن بهداشتی پسماند اثرات زیست‌محیطی کمتری بین سناریوهای پیشنهادی (سناریو۱: تلنبار پسماند، سناریو۲: دفن بهداشتی، سناریو۳: ٤۰ درصد تلنبار پسماند و ٦۰ درصد دفن بهداشتی، سناریو٤: ۱۰ درصد پسماندسوزی، ۳۵ درصد تلنبار کردن و ۵۵ درصد دفن بهداشتی) داشته و بیشترین تأثیرات زیست‌محیطی منفی مربوط به سناریو تلنبار پسماند است (۱۳). مواد مغذی مانند آمونیاک، اکسیدنیتروژن و فسفات مسئول اوتروفیکاسیون هستند. فرآیندهای بیولوژیکی در داخل محل دفن گازهای نیتروژن و فسفردار تولید می‌کنند که می‌توانند در شیرابه حل شوند و اثرات منفی بیشتری بر محیطزیست داشته باشند. سناریو ۲ و ۳ کمترین تأثیر اوتروفیکاسیون $kg\ PO_4^{3-}$ eq./t ۰/۰٤ را دارند که دلیل آن، جداسازی پسماند در مبداء است. همچنین تحقیقات نشان داده است که تلنبار کردن پسماند دارای اوتروفیکاسیون بالایی است (۰/٤۷ $kg\ PO_4^{3-}$ eq./t) طی این مطالعات وجود لاینرهای مصنوعی غیرقابل نفوذ و تصفیه شیرابه، واحد تولید کمپوست و دفن زباله کمترین اوتروفیکاسیون را خواهند داشت (۵). گزارش‌شده است در مراکز دفن، یک کیلوگرم پسماند ۰/۲۵ نانوگرم اوتروفیکاسیون ایجاد می‌کند(۲۵). سمیت انسان در اثر انتشار آلاینده‌هایی مانند ذرات معلق، اکسیدهای سولفور، اکسیدهای نیتروژن و فلزات سنگین ایجاد می‌شود. سناریوی ۵ (سوزاندن همراه با دفن پسماند) به دلیل انتشار بالای فلزات سنگین، اکسیدهای سولفور، اکسیدهای نیتروژن در طول فرآیند احتراق، منجر به بالاترین سمیت برای انسان است kg 1,4 DB eq./t ۱۰۰۰/۲۰). از میان نتایج احتمالی، سناریوی ۲ کمترین تأثیر سمیت (kg 1,4 DB eq./t ۳/۸۹) را دارد که نشان می‌دهد واحد کمپوست و بازیافت مواد تأثیر کمتری بر انتشار عوامل سمی نسبت به دفن پسماند دارند. فعل و انفعالات شیمیایی بین اکسیدهای نیتروژن، مونوکسیدکربن و آلاینده‌های آلی فرار در حضور نور خورشید باعث تولید ازن تروپوسفری شده که منجربه بروز آسم و سایر مشکلات تنفسی حتی درصورت تماس با دز کم ازن می‌شود (٦). اکسیدانهای فتوشیمیایی نظیر ترکیبات آلی فرار، دی اکسیدکربن، دی اکسیدنیتروژن، اکسیدهای نیتروژن و ذرات ریز که در اثر فرآیندهای ذکرشده، به محیط انتشار می‌یابند، منجربه تشکیل ازن تروپوسفری می‌شوند. مطابق نتایج سناریوی ۵ کمترین میزان پتانسیل اکسیداسیون معادل kg C_2H_4 eq./t ۰/۰۲- و سناریو ۱ بیشترین میزان ۰/۱ را دارد. Anchal و همکاران در سال ۲۰۲۳، از بین سناریوهای پیشنهادی (سناریو۱: بازیافت، کمپوست و پسماندسوزی، سناریو۲: بازیافت، کمپوست، بازیافت و دفت بهداشتی، سناریو۳: بازیافت، کمپوست و دفن بهداشتی و سناریو٤: بازیافت و دفن بهداشتی)، سناریو۳ را به‌عنوان مناسب‌ترین گزینه انتخاب کردند (١٤).

طی نتایج آنالیز حساسیت، مشخص شد که تأسیسات بازیابی مواد مزایا زیست‌محیطی ناشی از بازیافت را افزایش می‌دهند. تحقیقات همچنین نشان داده است که ترکیب تأسیسات بازیابی مواد، کمپوست‌سازی و دفن پسماند منجربه افزایش مزایای شاخص‌های زیست‌محیطی می‌شود (۵, ۷). به‌هرحال این پژوهش همچون سایر پژوهش‌ها دارای محدودیت‌هایی است. به‌رغم تلاش‌هایی که جهت جمع‌آوری دقیق اطلاعات در این مقاله صورت گرفت، اما محدودیت‌های داده‌ای، روش‌شناسی، تفسیری و هزینه‌ای باید در تحلیل‌ها موردتوجه قرار گیرند تا نتایج دقیق، شفاف و قابل‌اعتماد باشند. همچنین مطالعات بعدی در راستای ارزیابی چرخه حیات پسماند شهری باید به داده‌های دقیق، تحلیل‌های جامع و بهینه‌سازی فرآیندها توجه داشته باشند تا نتایج بهتری در زمینه کاهش اثرات زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی مدیریت پسماند به دست آید.

نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر به‌منظور ارزیابی مناسب‌ترین و پایدارترین سیستم مدیریت پسماند با استفاده از نرم‌افزار ارزیابی چرخه حیات جهت انتخاب سناریو با کمترین اثرات زیست‌محیطی انجام

شد. در میان ۵ سناریوی پیشنهادی، سناریوی ۲ (تأسیسات بازیابی مواد، واحد تولید کمپوست همراه با دفن پسماند)، کمترین تأثیرات زیست‌محیطی جهت مدیریت پسماند را داشت. میزان پارامترهای زیست‌محیطی بررسی‌شده در سناریو ۲ شامل پتانسیل گرمایش جهانی ۸٦۷/۲۰kg CO_2 eq./t یوتریفیکاسیون معادل ۰/۰۳۵ kg PO_4^{3-} eq./t، اسیدی سازی معادل ۰/۱۷ kg SO_2 eq./t، پتانسیل سمیت انسان معادل 1,4 kg DB eq./t ۳/۸۹ و تولید ازن تروپوسفری معادل kg C_2H_4 eq./t ۰/۰۷ به دست آمد.

سناریو۳ با حداقل انتشار گازهای گلخانه‌ای بیشترین سود و کمترین میزان گرمایش جهانی را در میان سناریوها داشت؛ زیرا بخش آلی پسماند به هاضم بی‌هوازی انتقال و بیوگاز و ماده هضم شده تولید می‌کند. بیوگاز را طی فرآوری به بیومتان تبدیل و جایگزین گازهای مایع کرده و یا در منازل مسکونی می‌توان استفاده کرد. از ماده هضم شده نیز می‌توان به‌عنوان کود در بخش کشاورزی استفاده نمود. بااین‌حال، سناریوی ۳ پتانسیل سمیت انسانی بیشتری در مقایسه با سناریوهای ۲ و ٤ داشت. به نظر می‌رسد سناریو۲ بهترین سناریو برای مدیریت پسماند برای شهر ورامین باشد و کمترین تأثیرات زیست-محیطی را ازنظر اسیدی‌سازی، یوتریفیکاسیون، سمیت انسانی و تولید ازن تروپوسفری داشته است که ازنظر بهداشت و محیط‌زیست نیز نسبتاً مطلوب هستند.

ارزیابی چرخه حیات سیستم‌های مدیریت پسماند نشان می‌دهد که انتشار گازهای جمع‌آوری‌نشده مراکز دفن پسماند، بزرگ‌ترین تهدید بالقوه برای محیط‌زیست هستند. مقوله‌های تأثیرات زیست‌محیطی، مانند نظر اسیدی‌سازی، یوتریفیکاسیون، سمیت انسان، تولید ازن تروپوسفری و پتانسیل گرمایش جهانی نیز می‌توانند به‌طور قابل‌توجهی با اتخاذ تأسیسات بازیابی مواد و روش‌های تصفیه بیولوژیکی مانند کمپوست‌سازی و هاضم بی‌هوازی کاهش یابند.

تشکر و قدردانی

مطالعه حاضر در کمیته اخلاق دانشکده علوم پزشکی خمین با کد IR.KHOMEIN.REC.1403.019 به ثبت رسیده است. بدین‌وسیله نویسندگان از دانشکده علوم پزشکی خمین جهت تأمین بودجه انجام این پروژه کمال تشکر و قدردانی را دارند.

تضاد منافع

در این پژوهش هیچ‌گونه تعارض منافعی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

مشارکت نویسندگان:

(۱) مفهوم‌پردازی و طراحی مطالعه، یا جمع‌آوری داده‌ها، یا تجزیه‌وتحلیل و تفسیر داده‌ها: همه نویسندگان

(۲) تهیه پیش‌نویس مقاله یا بازبینی آن جهت تدوین محتوای اندیشمندانه: همه نویسندگان

(۳) تائید نهایی دست‌نوشته پیش از ارسال به مجله: همه نویسندگان

References

1. Awasthi SK, Sarsaiya S, Kumar V, Chaturvedi P, Sindhu R, Binod P, et al. Processing of municipal solid waste resources for a circular economy in China: An overview. Fuel. 2022;317:123478.

https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123478

2. Richard EN, Hilonga A, Machunda RL, Njau KN. Life cycle analysis of potential municipal solid wastes management scenarios in Tanzania: the case of Arusha City. Sustainable Environment Research. 2021;31(1):1-13.

https://doi.org/10.1186/s42834-020-00075-3

3. Prado V, Cinelli M, Ter Haar SF, Ravikumar D, Heijungs R, Guinée J, et al. Sensitivity to weighting in life cycle impact assessment (LCIA). The International Journal of Life Cycle Assessment. 2020;25(12):2393-406.

https://doi.org/10.1007/s11367-019-01718-3

4. Rana R, Ganguly R, Kumar Gupta A. Evaluation of solid waste management in satellite Towns of Mohali and Panchkula–India. The Journal of Solid Waste Technology and Management. 2017;43(4):280-94.

https://doi.org/10.5276/JSWTM.2017.280

5. Rana R, Ganguly R, Gupta AK. Life-cycle assessment of municipal solid-waste management strategies in Tricity region of India. Journal of Material Cycles and Waste Management. 2019;21(3):606-23

https://doi.org/10.1007/s10163-018-00822-0

6. Mandpe A, Bhattacharya A, Paliya S, Pratap V, Hussain A, Kumar S. Life-cycle assessment approach for municipal solid waste management system of Delhi city. Environmental Research.

https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113424

7. Nyitrai J, Almansa XF, Zhu K, Banerjee S, Hawkins TR, Urgun-Demirtas M, et al. Environmental life cycle assessment of treatment and management strategies for food waste and sewage sludge. Water Research. 2023;240:120078.

https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120078

8. Yadav P, Samadder SR. Environmental impact assessment of municipal solid waste management options using life cycle assessment: a case study. Environmental Science and Pollution Research. 2018;25(1):838-54.

https://doi.org/10.1007/s11356-017-0439-7

9. Srivastava AK, Nema AK. Life cycle assessment of integrated solid waste management system of Delhi. Towards life cycle sustainability management: Springer; 2011. p. 267-76.

https://doi.org/10.1007/978-94-007-1899-9_26

10. Babu GS, Lakshmikanthan P, Santhosh L. Life cycle analysis of municipal solid waste (MSW) land disposal options in Bangalore City. ICSI 2014: Creating Infrastructure for a Sustainable World2014. p. 795-806.

https://doi.org/10.1061/9780784478745.075

11. (ISO) IOfS. ISO 14040:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. Geneva, Switzerland: European Standard; 2006.

https://www.iso.org/standard/37456.html#lifecycle

12. Mulya KS, Zhou J, Phuang ZX, Laner D, Woon KS. A systematic review of life cycle assessment of solid waste management: Methodological trends and prospects. Science of The Total Environment. 2022;831:154903.

https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154903

13. Paul PP, Bari QH, Saju JA, Islam MR, editors. Life cycle assessment of municipal solid waste management in Khulna city of Bangladesh. AIP Conference Proceedings; 2025: AIP Publishing LLC.

https://doi.org/10.1063/5.0247428

14. Sharma A, Ganguly R, Gupta AK. Life cycle assessment of municipal solid waste generated from hilly cities in India–A case study. Heliyon. 2023;9(11).

https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21575

15. Hoornweg D, Bhada-Tata P. What a waste: a global review of solid waste management. 2012.

https://doi.org/10.1596/17388

16. Zarea MA, Moazed H, Ahmadmoazzam M, Malekghasemi S, Jaafarzadeh N. Life cycle assessment for municipal solid waste management: a case study from Ahvaz, Iran. Environmental monitoring and assessment. 2019;191(3):131.

https://doi.org/10.1007/s10661-019-7273-y

17. Liu M, Tan Z, Fan X, Chang Y, Wang L, Yin X. Application of life cycle assessment for municipal solid waste management options in Hohhot, People's Republic of China. Waste Management & Research. 2021;39(1):63-72.

https://doi.org/10.1177/0734242X20959709

18. Lakiotia EN, Moustakas KG, Komilisc DP, Domopouloua AE, Karayannisa VG. Sustainable solid waste management: Socio-economic considerations. Chem Eng. 2017;56:661-6.

https://doi.org/10.3303/CET1756111

19. Thushari I, Vicheanteab J, Janjaroen D. Material flow analysis and life cycle assessment of solid waste management in urban green areas, Thailand. Sustainable Environment Research. 2020;30(1):21.

https://doi.org/10.1186/s42834-020-00057-5

20. Mannheim V. Perspective: Comparison of end-of-life scenarios of municipal solid waste from viewpoint of life cycle assessment. Frontiers in Built Environment. 2022;8:991589.

https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.991589

21. Rahimi F, Atabi F, Nouri J, Omrani G. Using life cycle assessment method for selecting optimal waste management system in Tehran city. Journal of Environmental Health and Sustainable Development. 2019.

https://doi.org/10.18502/jehsd.v4i4.2019

22. Fazio S; Vaccari L; Mathieux F. EPLCA - European Platform on Life Cycle Assessment. European Commission; 2016. JRC102497.

https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC102497

23. Cheniti H, Kerboua K, Sekiou O, Aouissi HA, Benselhoub A, Mansouri R, et al. Life Cycle Assessment of Municipal Solid Waste Management within Open Dumping and Landfilling Contexts: A Strategic Analysis and Planning Responses Applicable to Algeria. Sustainability. 2024;16(16):6930.

https://doi.org/10.3390/su16166930

24. Lodato C, Tonini D, Damgaard A, Fruergaard Astrup T. A process-oriented life-cycle assessment (LCA) model for environmental and resource-related technologies (EASETECH). The International Journal of Life Cycle Assessment. 2020;25(1):73-88.

https://doi.org/10.1007/s11367-019-01665-z